Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 14, No. 4, 2024, p. 429-443

Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters

A. Ghaffarnezhad[1], H. Navid[1*], H. Karimi[2]

1- Biosystems Engineering Department, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Agricultural Engineering Research Department, Kerman Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Kerman, Iran
(*- Corresponding Author Email: navid@tabrizu.ac.ir)

Received: 10 December 2023
Revised: 27 January 2024
Accepted: 19 February 2024
Available Online: 19 November 2024

How to cite this article:
Ghaffarnezhad, A., Navid, H., & Karimi, H. (2024). Development and Comparison of Interrupt-Based and Analog-to-Digital Converter Algorithms for Seed Counting in Precision Planters. *Journal of Agricultural Machinery, 14*(4), 429-443. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2024.85803.1210

Introduction

Improving field operations through precise spot planting rates depends on the accurate functioning of seed flow sensors within the working rows. Despite the availability of these sensors in the market, achieving measurement precision remains a challenge in their optimal design. Seed flow sensors can be categorized into two primary types: optical and non-optical. Among these, optical sensors—particularly infrared sensors—are gaining popularity among researchers due to their distinct advantages, including simple circuit design, cost-effectiveness, and a strong correlation with seed flow. However, the accuracy of these sensors tends to diminish over time due to dust accumulation from planting operations and the effects of sunlight. In response to these challenges, researchers are actively exploring various solutions, employing diverse approaches such as the development of different algorithms and the utilization of alternative hardware configurations. Each research initiative aims to address specific challenges associated with these sensors, with the overarching goal of facilitating effective commercialization, optimizing resource use, and minimizing waste.

Materials and Methods

Two distinct algorithms, utilizing analog-to-digital converter and interrupt-based methodologies, were meticulously developed and thoroughly evaluated to determine the more effective method for monitoring. Correspondingly, unique circuits were engineered for each algorithm.

To enhance the sensitivity of the sensor while simplifying the circuit's complexity and dimensions, the lm324 Op-Amp was used in the interrupt-based sensor circuit. Adjusting sensitivity was made feasible through a multi-turn potentiometer, enabling precise adjustment of the external interrupt within the microcontroller. On the other hand, the analog-to-digital converter-based circuit, without relying on the LM324 chip, provided a more straightforward and quieter configuration.

The intricate nature of construction mandated the design of circuits using Altium Designer 17 software, which was then printed onto circuit boards. Both developed circuits featured the deployment of the STM32F103C8T6 microcontroller, renowned for its robust capabilities and cost efficiency.

In the interrupt-based algorithm's development, the microcontroller's external interrupt was used, selecting its sensitivity to detect both rising and falling edges. This strategic configuration ensured comprehensive scanning of all receivers by the analog-to-digital converter upon any interruption in the infrared sensors. Given the singular passage of seeds in precision seeding, each pass was counted as a single seed.

At the start of the planting operation and upon reaching the end of each planting row, the microcontroller employed a micro-switch to sample the output of the infrared sensor, which were then used to execute further calculations based on those samples. Throughout the planting process, the microcontroller continuously

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

https://doi.org/10.22067/jam.2024.85803.1210

performed sensor scanning and promptly converted the sensor outputs into binary values based on defined thresholds. Then, it counted the seeds based on the predetermined counting thresholds for the number of passes.

The efficacy of these developed algorithms and sensors underwent rigorous testing encompassing hybrid corn seeds, popcorn, soybean, and mung bean. The evaluation was conducted on an 11-meter-long conveyor belt platform, tested at three different speeds: 4, 7, and 10 km h^{-1}, through five distinct iterations. This comprehensive evaluation ensured the robustness and reliability of the algorithms across diverse seed types and varying operational conditions.

Results and Discussion

Test results indicate that interrupt-based sensors demonstrate impressive seed counting capabilities; however, they may encounter issues such as susceptibility to dust and the need for manual recalibrations. Moreover, these sensors exhibited acceptable performance across various crops, including corn and soybeans. Nonetheless, variations in seed characteristics could affect counting accuracy. Additionally, simultaneous seed passage through the sensor under certain conditions posed challenges, diminishing the sensor's precision. On the other hand, sensors employing analog-to-digital algorithms showed promising performance. They offer enhanced adjustability compared to their interrupt-based counterparts, showcasing adaptability to diverse conditions. In summary, each sensor type has its strengths and weaknesses. Sensors that utilize analog-to-digital converter algorithms may offer superior performance in varied scenarios due to their advanced features and adaptable configurations.

Conclusion

This study developed and tested two seed counting algorithms: one based on interruption and the other utilizing an analog-to-digital converter. Both algorithms effectively counted seeds larger in diameter than the distance between adjacent LEDs with remarkable accuracy. However, due to their reliance on infrared optical components, both were susceptible to dust generated during planting operations. The algorithm utilizing the analog-to-digital converter demonstrated a notable advantage. Its ability to adjust the threshold either at the start of planting or at the end of each crop row provided a distinct edge over the interruption-based algorithm. Consequently, the analog-to-digital converter-based algorithm was selected as the superior choice for this research.

Acknowledgment

The authors express appreciation for the financial support provided by the University of Tabriz.

Keywords: Flow detection, Precision planter monitoring, Seed counting algorithm, Seed flow sensor

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۴، شماره ٤، زمستان ۱٤۰۳، ص ٤٤۳-٤۲۹

توسعه و مقایسه دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف‌کارها

علی غفارنژاد[۱]، حسین نوید[۱*]، هادی کریمی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده

امروزه برای اطمینان از کارکرد صحیح کارنده‌ها، سامانه‌های پایش روی آن‌ها نصب می‌شوند و می‌توانند اطلاعات برخطی را در اختیار اپراتور قرار دهند تا در صورت بروز هرگونه مشکل عملیات را متوقف و نسبت به رفع آن‌ها اقدام نماید. قسمت اصلی سامانه پایش کارنده‌ها، حسگر جریان دانه می‌باشد که روی لوله سقوط نصب می‌گردد. نسخه ساده این حسگرها تنها عبور بذر را تشخیص می‌دهند. اما اندازه‌گیری نرخ جریان دانه با توجه به شرایط کاری کارنده‌ها به‌ویژه کارنده‌های مکانیکی با چالش‌های جدی مواجه می‌باشد. در این تحقیق حسگر و الگوریتم منحصر به‌فرد و نوآورانه‌ای برای شمارش بذرهای عبوری توسعه داده شدند. یک ردیف هفت‌تایی از فرستنده‌های مادون قرمز و نیز یک ردیف هفت‌تایی از گیرنده‌های مادون قرمز در مقابل آن، وظیفه تشخیص بذرها را بر عهده داشتند. برای ارزیابی آزمایشگاهی حسگر و الگوریتم مربوطه، عملکرد دو روش دریافت سیگنال در میکروکنترولر بر اساس وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال روی سکوی تسمه نقاله با چهار بذر ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش در سه سرعت ۴، ۷ و ۱۰ کیلومتر بر ساعت و در پنج تکرار مورد آزمون قرار گرفت. هر دو الگوریتم مورد آزمون نتایج قابل‌قبولی را در شمارش بذور مورد آزمون از خود نشان دادند اما الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال به‌دلیل امکانات بیش‌تر و امکان تنظیم سطح آستانه در ابتدای عملیات کشت و انتهای هر ردیف و مقاومت بالاتر آن در مقابل گرد و غبار، عملکرد بهتری از خود نشان داد هرچند که الگوریتم روش دوم دارای دقت و سرعت بالایی بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شمارش بذر، پایش ردیف‌کار، تشخیص جریان، حسگر جریان بذر

مقدمه

برای دستیابی به عملکرد مطلوب محصول، لازم است بذور به میزان بهینه و به‌شکل یکنواخت در مزرعه کاشته شوند. پایش عملکرد کارنده‌ها در حین کاشت باعث می‌شود تا هرگونه اختلال در کارکرد بخش‌های مختلف آن، به‌موقع تشخیص داده شده و نسبت به رفع آن‌ها اقدام شود. این امر از هرگونه نکاشت که به‌طور معمول به‌خاطر گرفتگی لوله سقوط، خالی شدن مخزن بذر و غیره در مزارع اتفاق می‌افتد جلوگیری می‌نماید. همچنین این سامانه می‌تواند با اندازه‌گیری نرخ کاشت نقطه‌ای امکان مدیریت بهینه عملیات‌های بعدی در مزرعه را ممکن سازد.

حسگرهای بسیاری در سامانه‌های پایش کشت و کارنده‌ها برای سنجش وضعیت لوله سقوط مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر این اساس می‌توان این حسگرها را به دو گونه کلی نوری و غیرنوری طبقه‌بندی نمود. از جمله حسگرهای غیرنوری می‌توان به حسگرهای خازنی که برای سنجش جریان بذر در مورد استفاده قرار گرفته‌اند اشاره نمود. باکمن، حسگری خارنی برای پایش کارنده‌ها توسعه داد که با عبور بذور از آن ظرفیت خازن تغییر می‌کرد و بذور عبوری تشخیص داده می‌شدند. در این مطالعه برای جلوگیری از اثرگذاری اغتشاشات محیطی بدنه فلزی حسگر به ولتاژ زمین متصل شده بود (Bachman, 1988). از دیگر حسگرهای خازنی توسعه داده شده می‌توان به تحقیق انجام گرفته توسط تقی‌نژاد و همکاران برای تشخیص فاصله کاشت قلمه‌های نیشکر اشاره نمود (Taghinezhad, Alimardani, & Jafary, 2013). حسگرهای فراصوت نیز در بعضی از تحقیقات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به‌دلیل اثرپذیری از اغتشاشات توصیه

۱- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: navid@tabrizu.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jam.2024.85803.1210

نمی‌شوند و تنها به‌صورت آزمایشگاهی کاربرد دارند (Karimi, Navid, & Mahmoudi, 2015).

از حسگرهای نوری می‌توان به حسگرهای فیبرنوری، مقاومت نوری، سلول خورشیدی و مادون قرمز اشاره نمود. مهم‌ترین عیب اکثر حسگرهای نوری اثرپذیری از نور خورشید و تحت تاثیر قرارگیری از گرد و خاک حاصل از عملیات کاشت و بذور است که باعث گرفتگی این حسگرها و اشتباه در سنجش جریان بذر می‌شود. مدار حسگر سلول خورشیدی توسط بل (Bell, 1979) توسعه داده شد و شرکت جاندیر نیز حسگری بر این اساس تولید کرده است. این حسگر از یک حسگر سلول خورشیدی و یک منبع نوری تشکیل شده است. سایه بذرو عبور مانع از رسیدن نور به حسگر سلول خورشدی شده و یک پالس ایجاد می‌شود به این ترتیب، می‌توان بذور عبوری را تشخیص داد. محققین حسگر سنجش جریان بذر بر پایه حسگر فیبر نوری توسعه دادند. از مزیت‌های حسگر فیبر نوری می‌توان به پایش سراسری لوله سقوط و عدم تاثیرپذیری از نور خورشید اشاره نمود. این حسگر به‌دلیل هزینه‌های آن برای استفاده مزرعه‌ای و صنعتی مناسب نمی‌باشد (Al-Mallahi & Kataoka, 2013, 2016). از دیگر حسگرهای نوری به حسگر مقاومت نوری اشاره نمود. این حسگر نیز مانند سایر حسگرهای نوری با عبور بذر و ایجاد سایه روی مقاومت نوری بذور عبوری را تشخیص می‌دهد (Karimi, Navid, Besharati, Behfar, & Eskandari, 2017).

مورد اقبال‌ترین حسگر برای پایش عملیات کاشت حسگر نوری مادون قرمز است که دلیل این امر مدار راه‌انداز ساده، ارزان بودن و پایداری و همبستگی‌بالای خروجی آن با جریان عبوری می‌باشد (Karimi *et al.*, 2017). فرند جزو اولین کسانی بود که از این حسگر برای پایش جریان در کارنده‌ها استفاده نمود. این حسگر از هفت فرستنده و دو گیرنده مادون قرمز با آرایش خطی تشکیل شده بود که با عبور جریان از مقابل حسگر، بذور عبوری را شمارش می‌نمود (Friend, 1987). محققین با استفاده زیگزاگ از این حسگر توانستند تمامی لوله سقوط را اسکن کرده و مشکل عدم پایش قسمت‌هایی از لوله سقوط را مرتفع نمایند (Kocher, Lan, Chen, & Smith, 1998). همچنین محققین با چینش نود درجه‌ای گیرنده و فرستنده نسبت به هم توانست بذور عبوری را شمارش کند. در این تحقیق به‌منظور حداقل‌سازی انعکاس پرتوهای مادون قرمز از مواد جاذب در دیواره حسگر استفاده نمودند (El Attar, 2010). فو و همکاران نیز با چینش مدور گیرنده و فرستنده توانستند تا حدودی مشکل هم‌پوشانی بذور را مرتفع سازند (Fu *et al.*, 2012). محققین با استفاده از گیرنده TSOP که فقط طول موج خاصی از نور خورشید را دریافت می‌کند توانستند اثرگذاری نور خورشید را روی حسگر مادون قرمز تا حدود زیادی از بین ببرند. در این مطالعه از دو فرستنده مادون قرمز و یک گیرنده TSOP در کنار هم استفاده شد. با عبور بذر از مقابل حسگر پرتوی ارسالی به سمت گیرنده بازتاب داده می‌شد و بذور عبوری شمارش می‌شدند (Kumar & Raheman, 2018; Raheman & Kumar, 2015).

محققان یک حسگر مادون قرمز برای شمارش جریان دانه با استفاده از خطی‌سازی جریان با دو صفحه مایل توسعه دادند. در این تحقیق برای از بین بردن هم‌پوشانی بذور لوله سقوط به ۱۱ قسمت مختلف تقسیم شد و در هر قسمت از یک گیرنده و فرستنده مادون قرمز قرار داده شد که امکان گرفتگی لوله سقوط را افزایش می‌داد (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhiar, & Wang, 2019). لی و همکاران در مطالعه‌ای دیگر یک حسگر جریان بذر برای ردیف‌کاری بذور ریز توسعه دادند که به‌دلیل کاهش قطر لوله سقوط تنها از یک جفت گیرنده و فرستنده مادون قرمز در این حسگر استفاده شده بود (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhiar *et al.*, 2019). گروهی از محققان با انتخاب حسگر مادون قرمز برای تولید حسگر تجاری مادون قرمز برای استفاده در خطی‌کارها و چینش زیگزاگ ده جفت گیرنده و فرستنده مادون قرمز اقدام به توسعه حسگر پایش جریان لوله سقوط کارنده‌ها کردند. آن‌ها با جمع‌آوری داده‌های حسگرهای مختلف به‌وسیله یک واحد کنترل و ارسال آن‌ها به نمایشگر موجود در کابین راننده، یک سامانه پایش عملکرد کارنده‌ها را توسعه دادند (Besharati, Navid, Karimi, Behfar, & Eskandari, 2019; Karimi, Navid, Besharati, & Eskandari, 2019). فتحی‌پور و همکاران مقاومت حسگر توسعه داده شده توسط محققان پیشین را در مقابل گرد و غبار حاصل از عملیات کاشت را به‌صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری با کاربرد شیشه منحنی در مقابل حسگر بهبود بخشیدند (Fathipour, Navid, Karimi, Ghaffarnejad, & Wang, 2023).

گورک و همکاران یک سیستم آزمایشگاهی با یک جفت گیرنده و فرستنده متصل به لوله سقوط برای تشخیص گرفتگی توسعه دادند. این دو حسگر در مقابل هم قرار گرفته بودند و در صورت بروز گرفتگی نور ساطع شده از فرستنده به گیرنده نمی‌رسید و حسگر گرفتگی را تشخیص می‌داد (Ghorke & Yadav, 2022). گروهی از محققان نیز حسگرهای پایش لوله سقوط برای شمارش مقدار بذور عبوری توسعه دادند (Chen, Zhang, Pan, Du, & Ji, 2022; Jiang *et al.*, 2021; Xie *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023). غفارنژاد و همکاران یک حسگر مادون قرمز شمارش جریان بذر با هفت جفت گیرنده و فرستنده و چینش خطی آن‌ها برای ردیف‌کارها با استفاده از تشخیص شکل بذر عبوری توسعه دادند (Ghaffarnejad, Navid, & Karimi, 2022).

همان‌گونه که ذکر شد تا کنون تحقیقات بسیاری در مورد سنجش جریان بذر در خطی‌کارها و ردیف‌کارها صورت گرفته است و هر یک از تحقیقات صورت گرفته سعی در مرتفع‌سازی مشکلی از

مشکلات موجود در این حسگرها برای تجاری‌سازی این حسگرها و استفاده بهینه از منابع و جلوگیری از هدررفت منابع داشته‌اند. در تعدادی از تحقیقات بیان شده فقط بر روی تشخیص وجود جریان بذر و گرفتگی لوله سقوط و در تعدادی از تحقیقات نیز تنها بر روی تشخیص مقدار جریان بذر تمرکز شده است. در این تحقیق سعی می‌گردد یک حسگر مادون قرمز جریان بذر با الگوریتمی ابتکاری برای ردیف‌کاری توسعه داده شود تا علاوه بر تشخیص وجود جریان بذر و گرفتگی لوله سقوط، بذور عبوری را با دقت بالا شمارش نموده و در مقابل گرد و غبار حاصل از بذور و عملیات کاشت نیز مقاوم باشد تا گامی در امنیت غذایی این مرز و بوم و جلوگیری از اتلاف منابع ملی برداشته شود.

مواد و روش‌ها

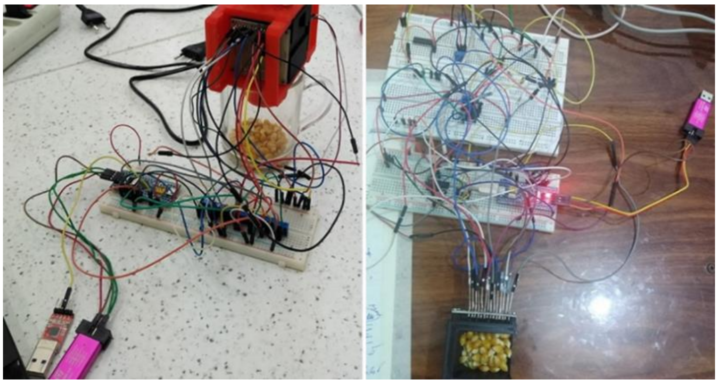
توسعه حسگر

حسگر در دو بخش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال مورد توسعه قرار گرفت که در ادامه توضیح داده می‌شود.

توسعه سخت‌افزار

الف: سخت‌افزار الگوریتم مبتنی بر وقفه

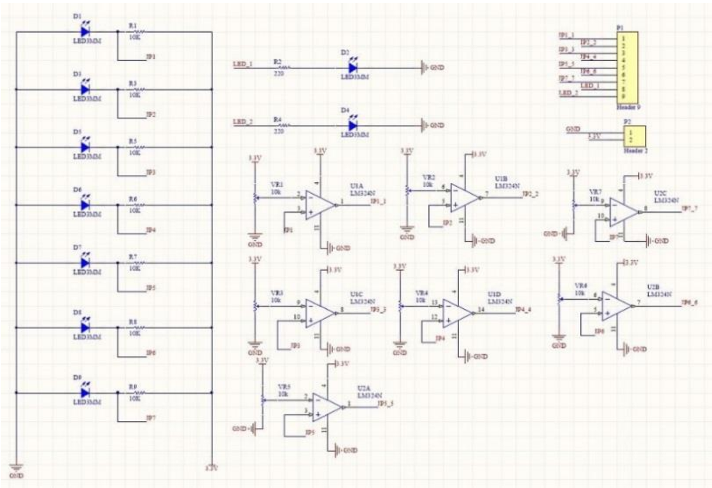
در این مطالعه از حسگر مادون قرمز با قطر سه میلی‌متر، ولتاژ کاری ۱/۴–۱/۲ ولت، حداکثر جریان ۱۰۰ میلی‌آمپر و طول موج ۹۴۰ نانومتر استفاده شد. ولتاژ خروجی حسگر مادون قرمز بر اساس کاهش در مقدار نور دریافتی به‌وسیله گیرنده، افزایش یا کاهش می‌یابد. در حالت عادی سایه بذر عبوری، باید تمامی سطح گیرنده ماون قرمز را بپوشاند تا وقفه خارجی در میکروکنترلر رخ دهد. اگر سایه بذر در حال عبور تمامی سطح گیرنده را نپوشاند، وقفه رخ نمی‌دهد. برای رفع این مشکل استفاده از یک تقویت‌کننده الزامی می‌باشد. با تکیه بر تحقیقات انجام‌گرفته، برای مرتفع‌سازی این مشکل از تقویت‌کننده LM324 استفاده شد. مزیت LM324 وجود چهار تقویت‌کننده در آن می‌باشد که پیچیدگی مدار حسگر کاهش می‌یابد.



شکل ۱– مدار طراحی‌شده برای وقفه با یک مولتی‌ترن (سمت راست)، مدار طراحی‌شده برای وقفه با هفت مولتی‌ترن (سمت چپ)
Fig.1. Circuit designed for interrupt-based algorithm with one multiturn (right) and seven multi-turns (left)

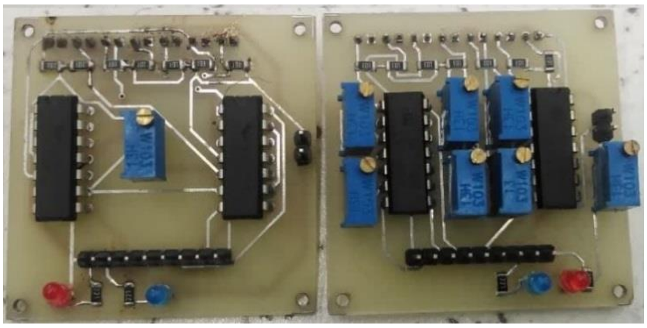
هم‌چنین برای تعیین حساسیت وقفه، استفاده از حداقل یک مولتی‌ترن برای این کار ضروری بود. مولتی‌ترن می‌توانست به دو صورت به‌کار برده شود. یکی از این حالات، استفاده از یک مولتی‌ترن برای تمامی گیرنده‌ها بود که در این صورت با تنظیم حساسیت به‌وسیله مولتی‌ترن حساسیت برای تمامی گیرنده‌ها به یک صورت تنظیم می‌گردید. مزیت استفاده از این حالت کاهش پیچیدگی مدار، امکان کاهش ابعاد مدار و هم‌چنین کاهش هزینه‌ها بود. اما عیب استفاده از این حالت این بود که با تنظیم حساسیت تمامی گیرنده‌ها به‌صورت یک‌جا، حساسیت تعدادی از گیرنده‌ها زیاد و حساسیت تعدادی نیز کم می‌شد. حالت دیگر استفاده از یک مولتی‌ترن برای هر گیرنده بود. مزیت این روش امکان تنظیم جداگانه حساسیت برای هر یک از گیرنده‌ها بود. اما معایب این روش افزایش هزینه‌ها، پیچیدگی تولید و افزایش ابعاد مدار بود. هر یک از مدارات پیشنهادی توسط محقق ساخته شده و مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۱ نمایی از این مدارات نمایش داده شده است.

پس از تایید کارکرد مدار محقق ساخته، به این دلیل که مدار ساخته‌شده خیلی پیچیده بود و توانایی آزمون روی سکو وجود نداشت، مدارات پیشنهادی در نرم‌افزار آلتیوم دیزاینر ۲/ ۱۷ طراحی و چاپ شد (شکل ۲ و شکل ۳).



شکل ۲– طرح‌واره مدار وقفه با هفت مولتی‌ترن و بدون میکروکنترلر

Fig.2. Interrupt circuit diagram with seven multi-turns and without microcontroller



شکل ۳– مدار وقفه با هفت مولتی‌ترن (سمت راست) و با یک مولتی ترن (سمت چپ)

Fig.3. Interrupt circuit with seven multi-turns (right side) and with one multi-turn (left side)

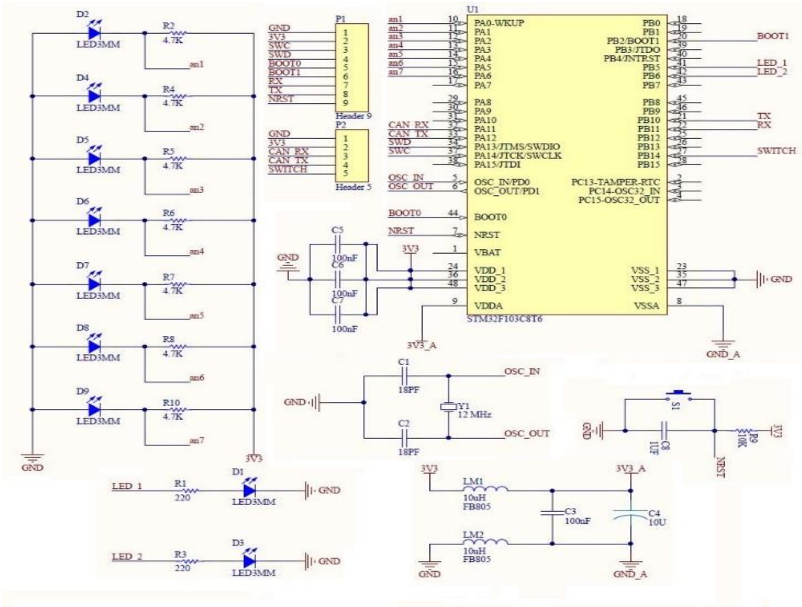
ب: سخت‌افزار الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

مدارات الگوریتم‌های مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال ساده‌تر و خلوت‌تر از مدارات الگوریتم مبتنی بر وقفه بودند، زیرا دو عنصر تقویت‌کننده و مولتی‌ترن از آن حذف شده بودند. توسعه مدارات بر اساس هفت گیرنده و فرستنده مادون‌قرمز که با آرایش خطی برای تحت پوشش قرار دادن کل سطح مقطع لوله در کنار هم قرار گرفته بودند، انجام شد. شماتیک مدار مربوط به الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال در شکل ۴ قابل‌مشاهده می‌باشد.

برای به حداکثر رساندن نور فرستنده‌های مادون قرمز از مقاومت ۱۰۰ اهم استفاده شد. برای افزایش مقاومت حسگر در مقابل گرفتگی در مقابل سخت‌افزار توسعه‌داده‌شده برای هر دو نوع الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال از شیشه منحنی با قطر انحنای ۱۸ میلی‌متر استفاده شد (Fathipour *et al.*, 2023). شکل ۵ نمایی از حسگر جریان بذر ساخته‌شده برای الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال را نمایش می‌دهد.

میکروکنترلر

میکروکنترلر استفاده شده در سامانه پایش ردیف‌کارها میکروکنترلر STM32F103C8T6 با معماری آرم و ساخت شرکت STMicroelectronics می‌باشد. این میکروکنترلر یک میکروکنترلر ۳۲ بیتی است که ترکیبی از عملکرد بسیار قوی و ولتاژ کاری پایین را به ارمغان می‌آورد. سری STM32F1 جزء میکروکنترلرهای میان‌رده اما در عین حال دارای قدرت پردازشی زیاد خانواده STM32 می‌باشند که دارای پردازنده Cortex-M3 می‌باشند. محبوب‌ترین میکروکنترلر از این خانواده میکروکنترلر STM32F103C8T6 می‌باشد. فرکانس کاری بالا، ۳ درگاه UART، پشتیبانی از کن‌باس، و رزولوشن بسیار بالا در مبدل آنالوگ به دیجیتال و قیمت بسیار مناسب این میکروکنترلر را به انتخابی مناسب برای حسگر پایش جریان بذر و واحد جمع‌آوری و ارسال، مبدل می‌کند. در برد طراحی‌شده برای حسگر پایش جریان از پکیج LQFP48 این میکروکنترلر استفاده شد.



شکل ٤– طرح‌واره مدار گیرنده مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

Fig.4. Schematic of receiver circuit based on analog to digital converter



شکل ۵– نمونه اولیه حسگر جریان بذر برای الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

Fig.5. Prototype seed flow sensor for analog-to-digital converter based algorithm

توسعه الگوریتم مبتنی بر وقفه خارجی

وقفه یکی از قابلیت‌های مهم میکروکنترلرها است. وقفه می‌تواند به‌صورت داخلی یا خارجی باشد. وقفه خارجی در میکروکنترلرهای شرکت ST به سه حالت لبه بالارونده، لبه پایین‌رونده یا هر دو لبه بالارونده و پایین‌رونده است. وقتی بذری از مقابل حسگر عبور می‌کند، باعث کاهش نور دریافتی به‌وسیله حسگر مادون قرمز می‌شوند و وقفه رخ می‌دهد. اگر وقفه هم بر روی لبه بالارونده و هم لبه پایین‌رونده تنظیم شود، در میکروکنترولر، هم وقتی سایه بذری بر روی یک گیرنده مادون قرمز افتاد، وقفه رخ می‌دهد و هم زمانی که سایه آن از روی گیرنده برداشته شد. به این ترتیب کوچک‌ترین حرکتی در مقابل حسگر قابل شناسایی خواهد بود و چون از طریق وقفه این عمل رخ می‌دهد، هیچ حرکتی از دست نخواهد رفت. حال اگر هر بار که وقفه رخ داد وضعیت پین‌های دیگر وقفه نیز خوانده شده و در داخل یک آرایه ذخیره شود، به‌سان این است که مقطع عرضی از لوله سقوط در طول زمان اسکن می‌شود. در شکل ۶ این آرایه مشاهده می‌گردد.

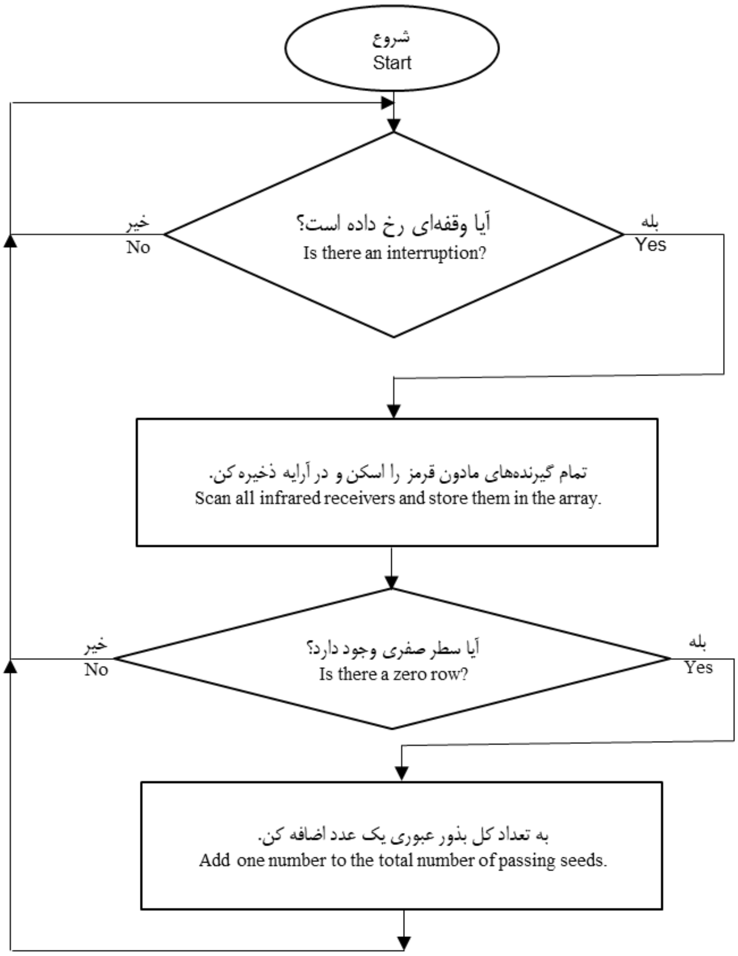
با دقت در آرایه مورد نظر می‌توان مشاهده نمود که تعداد وقفه رخ داده به‌وسیله عبور یک بذر به اندازه بذر و نحوه عبور آن از مقابل حسگر بستگی دارد و چون در ردیف‌کاری، بذور با فاصله از یک‌دیگر از مقابل حسگر عبور می‌کنند می‌توان با شمارش یک‌ها و کالیبره کردن آن برای هر بذر، بذور عبوری را شمارش نمود. شکل ۷ نمودار جریان الگوریتم وقفه توسعه‌داده‌شده را نشان می‌دهد.

برنامه‌نویسی الگوریتم‌های پیشنهادی در نرم‌افزار keil uvision V5.25.0 صورت گرفت. برای این کار ابتدا تنظیمات لازم برای بخش‌های مورد نظر در نرم‌افزار stm32cubeMX 4.25.1 و توابع هال نسخه ۱٫۶٫۱ انجام شد. سپس کدهای لازم تولید شده و در نرم‌افزار Keil µVision V5.25.2.0، ادامه برنامه‌نویسی انجام گردید. بارگذاری برنامه نوشته‌شده در میکروکنترلر انتخابی توسط پروگرمر ST LINK V2 انجام گرفت. هم‌چنین برای چاپ داده‌ها در کامپیوتر از یک مبدل USB به سریال CP2102 بهره گرفته شد (شکل ۸).

```
0,0,0,0,0,0,0
0,0,1,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0
0,0,0,1,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0
0,0,1,0,0,0,0
0,0,1,1,0,0,0
0,0,1,0,0,0,0
0,0,0,0,0,0,0
```

شکل ٦- آرایه ذخیره‌شده بعد از عبور بذرها از مقابل حسگر

Fig.6. The stored array after the seeds passes through the sensor arrays



شکل ۷- نمودار جریان الگوریتم مبتنی بر وقفه

Fig.7. Flow chart of interrupt-based algorithm

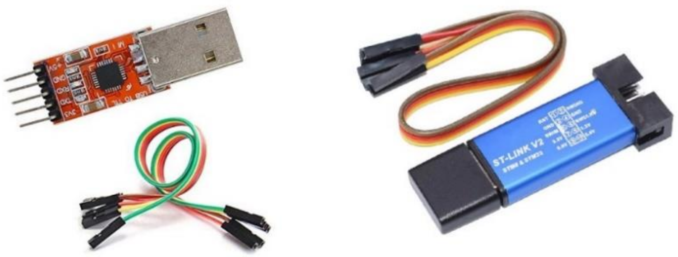
توسعه الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

مبدل آنالوگ به دیجیتال یکی از پرکاربردترین واحدهای میکروکنترلرها است که برای راه‌اندازی اکثر حسگرها به‌کار می‌رود. یکی از این حسگرها، حسگر مادون قرمز است که با توجه به مقدار نور مادون قرمز دریافتی توسط گیرنده، ولتاژ خروجی آن تغییر کرده و در میکروکنترلر با توجه به چند بیتی بودن مبدل آنالوگ به دیجیتال آن، از صفر تا یک مقدار مشخص تغییر می‌کند.

بر اساس توضیحات ارایه‌شده و با الهام از الگوریتم توسعه‌داده‌شده

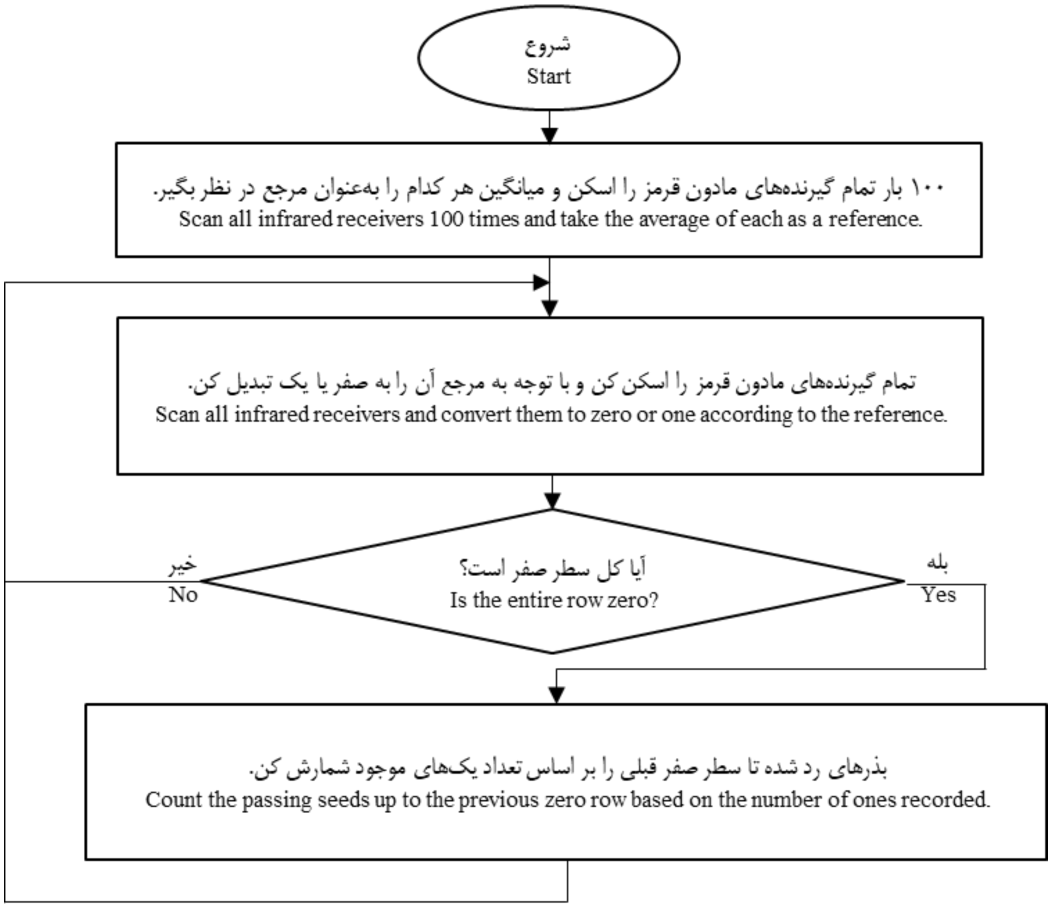
برای وقفه الگوریتمی بر اساس مبدل آنالوگ به دیجیتال توسعه داده شد. نمودار جریان این الگوریتم در شکل ۹ قابل‌مشاهده است.

همچنین یک پایه میکروکنترلر به‌عنوان پایه وقفه خارجی تعریف شد تا در هنگام فشرده شدن کلید در انتهای ردیف کاشت، حسگر متوجه عدم جریان بذر شده و شروع به نمونه‌گیری مجدد نموده و محاسبات بعدی خود را بر اساس نمونه اخیر انجام دهد. به این ترتیب تاثیر گرد و خاک موجود بر روی شیشه به حداقل می‌رسد و حسگر با نادیده گرفتن اثر گرد و غبار بر روی شیشه به کار خود ادامه داده و از حساسیت آن کاسته نمی‌شود. این نوع نمونه‌برداری نسبت به نمونه‌برداری فقط در ابتدای کار دارای مقاومت بیش‌تری نسبت به گرد و خاک است و تا حدود زیادی می‌تواند مانع از گرفتگی حسگر شود.



شکل ۸– پروگرمر ST Link V2 (راست) و مبدل USB به سریال CP2102 (چپ)

Fig.8. ST Link V2 programmer (right) and USB to CP2102 serial converter (left)

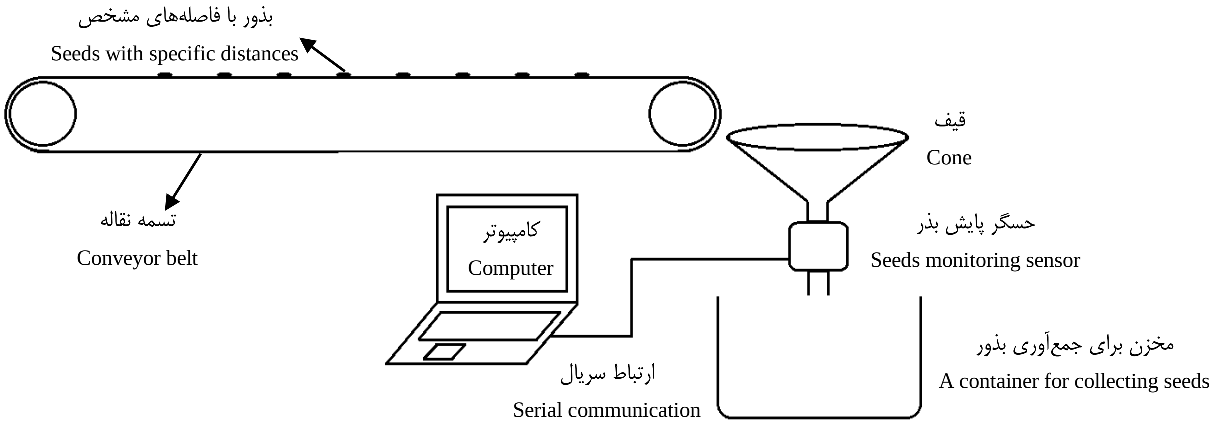


شکل ۹– نمودار جریان الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

Fig.9. Flow chart of analog-to-digital converter based algorithm

سکوی آزمون

به‌منظور توسعه و آزمایش الگوریتم حسگر از سکوی تسمه نقاله بهره گرفته شد، که در این سکو از یک تسمه‌نقاله بی‌انتها به طول ۱۱ متر، مستقر در آزمایشگاه کشاورزی دقیق دانشگاه تبریز استفاده شده‌است. این تسمه‌نقاله توسط الکتروموتور ۰/۳۷ کیلووات ساخت شرکت موتوژن تبریز، توسط یک VFD، به‌کار می‌افتاد. برای ارزیابی حسگر روی یک سه‌پایه در انتهای تسمه‌نقاله قرار داده شد. به‌منظور جمع‌آوری بذور از یک قیف مقوایی استفاده گردید تا تمامی بذور از مقابل حسگر عبور کنند. طرح‌واره تسمه‌نقاله و نحوه قرارگیری حسگر در شکل ۱۰ قابل‌مشاهده است. حسگر توسعه‌داده‌شده برای ردیف‌کاری به‌وسیله ۱۰۰ عدد از هر بذر مورد آزمون، در سه سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش‌روی کم)، ۷ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش‌روی متوسط) و ۱۰ کیلومتر بر ساعت (سرعت پیش‌روی زیاد) و در ۵ تکرار بر روی تسمه نقاله مورد آزمایش قرار گرفت. برای ارزیابی دقت شمارش حسگر، مقدار شمارش‌شده توسط حسگر به مقدار واقعی بذور تقسیم شد و به‌صورت دقت گزارش شد.



شکل ۱۰- طرح‌واره تسمه‌نقاله استفاده‌شده برای ارزیابی حسگرهای توسعه‌داده‌شده

Fig.10. Conveyor belt diagram used to evaluate the developed sensors

مواد آزمایشی

هدف این تحقیق توسعه حسگر شمارش بذر برای ردیف‌کارها بود. به‌همین دلیل برای ارزیابی، بذرهایی در نظر گرفته شد که محدوده وسیعی از اندازه و شکل بذوری که به‌صورت ردیفی کاشته می شوند را در برگیرد. لذا بذر ذرت کراس (که هم قابلیت کاشت به‌صورت علوفه‌ای و هم به‌صورت دانه‌ای را دارد)، ذرت پاپ‌کرن، ماش و سویا در آزمایش‌ها استفاده شدند تا عملکرد الگوریتم و حسگر توسعه‌داده‌شده تحت اشکال و اندازه‌های مختلف بذور مورد آزمون قرار گیرد.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی بذور مورد استفاده برای توسعه و ارزیابی حسگر پایش جریان بذر

Table 2- Physical characteristics of seeds used for development and evaluation of flow monitoring sensor

بذر Seed	جرم هزاردانه Mass of 1,000 seeds (g)	ضریب کرویت Sphericity factor	قطر هندسی Geometric diameter (mm)
ذرت کراس Hybrid corn	338.87	0.79	7.77
ذرت پاپ‌کرن Popcorn	183.71	0.72	6.27
سویا Soybeans	170.19	0.86	6.30
ماش Mung beans	67.29	0.81	4.26

مشخصات فیزیکی این بذور در جدول ۱ مشاهده می‌شود. برای اندازه‌گیری قطر هندسی بذور مورداستفاده، تعداد صد عدد از هر بذر انتخاب و با یک عدد کولیس دیجیتالی ابعاد آن‌ها در سه جهت متعامد اندازه‌گیری شد. میانگین قطر هندسی صد بذر قطر هندسی بذر مورد اندازه‌گیری در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری جرم هزاردانه بذور مورد استفاده نیز تعداد هزار عدد بذر به‌صورت دستی شمارش و با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت یک صدم، جرم آن اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

آزمایش‌های ارزیابی حسگر مبتنی بر وقفه بر روی تسمه‌نقاله در سه سرعت کاشت و پنج تکرار برای ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش انجام شد. مقادیر به‌دست‌آمده به‌صورت دقت در جدول ۲ مشاهده می‌گردد که از تقسیم مقدار شمارش‌شده توسط حسگر بر مقدار واقعی به‌دست آمده‌اند.

جدول ۲– دقت الگوریتم مبتنی بر وقفه برای بذور مورد آزمون بر روی تسمه نقاله

Table 2- Accuracy of interrupt-based algorithm for test seeds on conveyor belt

نوع بذر Seed type	سرعت Speed (km.h^{-1})	Precision – دقت					
		تکرار ۱ Repeat 1	تکرار ۲ Repeat 2	تکرار ۳ Repeat 3	تکرار ٤ Repeat 4	تکرار ۵ Repeat 5	میانگین Mean
ذرت پاپ‌کرن Popcorn	4	0.99	0.98	1	0.99	0.99	0.99
	7	1	0.99	0.99	0.98	1	0.992
	10	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
ذرت کراس Hybrid corn	4	0.99	0.98	1	0.99	0.99	0.99
	7	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
	10	0.99	0.99	0.97	0.98	1	0.986
ماش Mung beans	4	0.96	0.98	0.99	0.97	0.98	0.976
	7	0.99	0.95	0.96	0.96	0.99	0.97
	10	0.95	0.97	0.95	0.98	0.94	0.958
سویا Soybeans	4	1	0.98	0.99	0.98	1	0.99
	7	0.99	1	0.99	0.99	0.97	0.988
	10	0.99	0.98	0.97	0.99	0.98	0.982

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، دقت‌های اندازه‌گیری‌شده برای الگوریتم مبتنی بر وقفه بسیار بالا بوده و با توجه به نتایج محققان دیگر (Liu, Hu, Zhao, Pan, Lakhiar *et al.*, 2019; Xie *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023) قابل‌قبول هستند. در نگاه اول ملاحظه می‌شود که دقت شمارش بذر ماش نسب به بذور دیگر کم‌تر است. این امر می‌تواند به قطر هندسی بذر ماش مربوط شود. قطر هندسی بذر ماش ۴/۲۶ میلی‌متر می‌باشد که از حداقل فاصله مرکز به مرکز گیرنده‌های مادون قرمز (۴/۵ میلی‌متر) کم‌تر است. بنابراین ممکن است تعدادی از بذور ماش هنگام عبور از مقابل حسگر، یا از بین پرتوهای مادون قرمز عبور کرده و یا پرتو مادون قرمز را به مقدار جزئی قطع کنند که باعث عدم تشخیص این بذور توسط حسگر توسعه داده می‌شود.

به این دلیل که حسگر بر پایه وقفه توسعه‌داده‌شده بود و چون قطر هندسی تمامی بذور مورد آزمون به‌جز بذر ماش از فاصله بین گیرنده‌های مادون قرمز بیش‌تر بود، نباید بذری از دید حسگر پنهان می‌ماند. در صورتی‌که دقت‌های ارائه‌شده در جدول ۲، مطلبی مغایر با این دیدگاه را نشان می‌دهند. موردی که در آزمایش‌ها توسط محقق مشاهده شد این بود که بذوری که از روی تسمه‌نقاله با سرعت روی قیف تعبیه‌شده برای جمع‌آوری بذور سقوط می‌کردند، در قسمت‌های مختلفی فرود می‌آمدند. این امر باعث عبور چندین بذر به‌صورت هم‌زمان از مقابل حسگر می‌گردید که باعث هم‌پوشانی بذور شده و به این ترتیب بعضی از بذرها از دید حسگر پنهان می‌ماندند. هم‌چنین ممکن است بذور عبوری با هم‌پوشانی جزئی با یکدیگر و به‌صورت هم‌زمان از مقابل حسگر رد شوند. در این صورت حسگر با توجه الگوریتم تعریف‌شده شکل سایه بذور عبوری را تشخیص می‌دهد ولی بذور عبوری را کم‌تر شمارش می‌کند، مثلا دو بذر عبوری را یک بذر یا سه بذر عبوری را دو بذر تشخیص می‌دهد و دقت حسگر در تشخیص بذور عبوری کاهش می‌یابد.

وقفه، ابزاری بسیار کارآمد برای تشخیص عبور بذر از مقابل حسگر است و کوچک‌ترین حرکات را به‌وسیله آن می‌توان پایش

نمود. با این حال مشکل اساسی وقفه، تاثیرپذیری آن از گرد و غبار حاصل از بذور و عملیات کاشت است. این مشکل وقتی جدی‌تر می‌گردد که تنظیم حساسیت وقفه به‌صورت سخت‌افزاری صورت می‌گیرد و در صورت تاثیرپذیری هر یک از حسگرها به‌وسیله غبار، اپراتور بایستی عملیات کاشت را متوقف کرده، قسمت داخلی حسگر را از پوسته خارج کرده و حساسیت وقفه را کاهش دهد. این کار علاوه بر پرزحمت و زمان‌بر بودن، کاری تخصصی بوده و تمامی افراد مهارت لازم برای این کار را ندارند.

شکل ۱۱ نمونه‌ای از خروجی حسگر مبتنی بر وقفه در حالت گرفتگی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در صورت گرفتگی حسگر، همان‌طور که می‌توان انتظار داشت تمام گیرنده‌ها مسدود نمی‌شوند و فقط تعدادی از آن‌ها به‌خاطر گرد و خاک یا هر عامل خارجی دیگر گرفته می‌شوند. در صورت رخ دادن چنین اتفاقی حسگر هم‌چنان قادر به شناسایی بذور عبوری است ولی به‌دلیل عدم وجود سطر صفر که لازمه شمارش است از کار شمارش باز مانده و به‌طور کلی کار حسگر مختل می‌شود.

```
0,0,0,1,0,0,0
0,1,0,1,0,0,0
0,0,0,1,0,0,0
1,0,0,1,0,0,0
1,1,0,1,0,0,0
1,0,0,1,0,0,0
0,0,0,1,0,0,0
0,0,0,1,0,1,0
0,0,0,1,0,0,0
0,0,1,1,0,0,0
0,0,0,1,0,0,0
0,1,0,1,0,0,0
0,0,0,1,0,0,0
```

شکل ۱۱- خروجی حسگر وقفه در صورت گرفتگی

Fig.11. Interrupt sensor output in case of blockage

در حسگر توسعه‌داده‌شده توسط کروسی و همکاران که یک حسگر بذر تجاری بر مبنای وقفه است نیز مشکل گرد و خاک وجود دارد و در صورت وجود غبار بیش از حد در مقابل حسگر، چراغی مبنی بر نیاز به تمیزکاری حسگر به‌صورت دستی، روشن می‌گردد و اپراتور باید عملیات کاشت را متوقف کرده و حسگر را تمیز نماید. البته این حسگر در مقابل غبار تقویت شده است و در صورت وجود غبار در مقابل گیرنده‌ها، نور فرستنده‌ها تقویت می‌شود به این ترتیب حسگر تا حدودی در مقابل غبار از خود مقاومت نشان می‌دهد (Körösi, Csatári, Erdei, & Silye, 2020).

راه‌حل دیگری برای تنظیم حساسیت خودکار وقفه نیز وجود دارد و آن هم استفاده از تراشه‌هایی مانند MCP4131 است که یک پتانسیومتر با ارتباط SPI است که می‌توان با استفاده از میکروکنترلر و به‌صورت خودکار مقاومت آن را تغییر داد. ولی عیب استفاده از این روش این بود که تراشه مورد اشاره، قیمتی معادل با قیمت میکروکنترلر مورد استفاده داشت و استفاده از آن علاوه بر افزایش ابعاد و پیچیدگی مدارات حسگر، باعث افزایش بسیار زیاد هزینه‌ها نیز می‌شد.

بررسی نتایج الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال

نتایج آزمایش‌های ارزیابی الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال برای ذرت کراس، ذرت پاپ‌کرن، سویا و ماش در جدول ۳ آورده شده‌اند. این الگوریتم نیز در سه نرخ و پنج تکرار برای هر بذر، مورد آزمون قرار گرفت.

دقت‌های به‌دست‌آمده برای این الگوریتم در بذور مورد آزمون حاکی از کارکرد قابل‌قبول این الگوریتم برای ردیف‌کاری می‌باشد. با دقت مختصر در داده‌ها می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت کاشت، دقت‌های به‌دست‌آمده برای بذور با مقداری کاهش روبه‌رو بوده است. دلیل این امر با توجه به توضیحات ارائه‌شده در قسمت قبل می‌تواند اشکال در واحد جمع‌آوری بذور در زیر تسمه‌نقاله باشد که امری اجتناب‌ناپذیر بود. با سقوط چندین بذر به‌صورت هم‌زمان این اشکال به‌وجود می‌آید، در صورتی‌که در شرایط واقعی به‌ندرت چنین شرایطی پیش خواهد آمد.

جدول ۳- نتایج آزمون الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
Table 3- Test results of the analog to digital converter based algorithm

نوع بذر Seed type	سرعت Speed (km.h^{-1})	Precision – دقت تکرار ۱ Repeat 1	تکرار ۲ Repeat 2	تکرار ۳ Repeat 3	تکرار ٤ Repeat 4	تکرار ۵ Repeat 5	میانگین Mean
ذرت پاپ‌کرن Popcorn	4	1	0.99	0.99	1	0.98	0.992
	7	0.98	0.96	0.99	0.95	1	0.976
	10	0.94	0.97	0.95	0.93	0.96	0.95
ذرت کراس Hybrid corn	4	0.96	1	1	0.99	0.99	0.988
	7	0.98	0.97	0.96	0.98	1	0.978
	10	0.96	0.95	0.99	0.94	0.93	0.954
ماش Mung beans	4	0.99	0.99	0.98	0.97	0.98	0.982
	7	0.97	0.98	0.97	0.96	0.98	0.972
	10	0.94	0.95	0.93	0.94	0.96	0.944
سویا Soybeans	4	0.99	1	0.99	1	0.99	0.994
	7	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	0.982
	10	0.97	0.97	0.99	0.99	0.98	0.98

آستانه‌های تعریف‌شده برای بذور مورد آزمون در جدول ۴ قابل‌مشاهده است. به این ترتیب که حسگر هنگام عبور بذر با توجه به سایه بذر عبوری، یک‌های ایجادشده در اثر عبور بذر مورد آزمون را شمارش می‌نمود و با توجه به تعداد آن‌ها بذور عبوری را شمارش می‌نمود. به‌عنوان مثال در بذر سویا اگر تعداد یک‌های تولیدشده کوچک‌تر یا مساوی ۱۰ بود حسگر تعداد بذر عبوری را یک شمارش می‌نمود، اگر تعداد یک‌های تولیدشده بزرگ‌تر از ۱۰ و کوچک‌تر یا مساوی ۱۵ می‌بود، حسگر تعداد بذر عبوری را ۲ عدد شمارش می‌نمود و اگر تعداد یک‌های تولیدشده بزرگ‌تر از ۱۵ عدد بود حسگر به بذور شمرده‌شده ۳ عدد اضافه می‌کرد.

جدول ٤- آستانه تعریف‌شده برای شمارش بذور در الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال
Table 4- Defined threshold for seed counting in analog-to-digital converter based algorithm

عبور Pass	ذرت کراس Hybrid corn	ذرت پاپ‌کرن Popcorn	سویا Soybean	ماش Mung beans
عبور تکی Single pass	15	9	10	4
عبور دوگانه Double pass	18	13	15	7

گرچه دقت‌های شمارش تا حد زیادی در دو الگوریتم مشابه هم بوده و حتی در بعضی از موارد ممکن است الگوریتم مبتنی بر وقفه عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم مبتنی بر مبدل دیجیتال داشته باشد اما الگوریتم مبتنی بر مبدل دیجیتال به آنالوگ به دلیل امکانات بهتر و توانایی تغییر متغیرهایی نظیر حد آستانه که در الگوریتم مبتنی بر وقفه به‌صورت سخت‌افزاری تنظیم می‌شود برتری قابل‌توجهی نسبت به الگوریتم مبتنی بر وقفه دارد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو الگوریتم مبتنی بر وقفه و مبدل آنالوگ به دیجیتال برای شمارش بذور در ردیف‌کاری توسعه و مورد آزمون قرار گرفتند. هر دو الگوریتم با دقت بسیار بالا بذور عبوری با قطر هندسی بیش‌تر از فاصله بین دو ال‌ای‌دی مجاور را شمارش نمودند. هر دو الگوریتم به علت استفاده از المان‌های نوری مادون قرمز تحت تاثیر غبار حاصل از عملیات کاشت قرار می‌گیرند ولی الگوریتم مبتنی بر مبدل آنالوگ به دیجیتال به دلیل امکان تغییر حد آستانه در ابتدای عملیات کاشت یا در انتهای هر ردیف کشت برتری قابل‌توجهی نسبت به الگوریتم مبتنی بر وقفه دارد و به‌عنوان الگوریتم برتر شناخته شد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسندگان از حمایت مالی دانشگاه تبریز قدردانی می‌نمایند.

مشارکت نویسندگان

علی غفارنژاد: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، جمع‌آوری داده، پردازش داده، خدمات نرم‌افزاری، اعتبارسنجی، استخراج متن
حسین نوید: نظارت و مدیریت، مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، ویرایش متن
هادی کریمی: مشاوره فنی، روش‌شناسی، مفهوم‌سازی

References

1. Al-Mallahi, A., & Kataoka, T. (2013). Estimation of mass flow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, *99*, 116-122. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.005
2. Al-Mallahi, A., & Kataoka, T. (2016). Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, *121*, 412-419. https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.006
3. Bachman, W. J. (1988). Capacitive-type seed sensor for a planter monitor. In: Google Patents.
4. Bell, D. M. (1979). Optical seed sensor for a seed planter monitor. In: Google Patents.
5. Besharati, B., Navid, H., Karimi, H., Behfar, H., & Eskandari, I. (2019). Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*, 874-881. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.041
6. Chen, J., Zhang, H., Pan, F., Du, M., & Ji, C. (2022). Control system of a motor-driven precision no-tillage maize planter based on the CANopen protocol. *Agriculture*, *12*(7), 932. https://doi.org/10.3390/agriculture12070932
7. El Attar, M. (2010). Seeds Counting Device Based on Light Reflectance Optoelectronic Field Detection. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, *27*(1), 362-371. https://doi.org/10.21608/mjae.2010.107177
8. Fathipour, A., Navid, H., Karimi, H., Ghaffarnejad, A., & Wang, N. (2023). An approach to compensation of dust effects on seed flow sensors. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *25*(1), 43-58.
9. Friend, K. D. (1987). Article or seed counter. In: Google Patents.
10. Fu, W., Meng, Z., Wu, G., Dong, J., Mei, H., & Zhao, C. (2012). Study on monitoring system of wheat sowing. *International Society of Precision Agriculture*, 1-10.
11. Ghaffarnejad, A., Navid, H., & Karimi, H. (2022). *A new algorithm for detecting and measuring seed flow in the seed drills*. Paper presented at the 14th National Congress of Mechanical Engineering of Biosystems and Mechanization of Iran, Kermanshah, Iran.
12. Ghorke, R., & Yadav, B. (2022). Development of sensor system for detection of choking of the boot of maize planter.
13. Jiang, M., Liu, C., Du, X., Huang, R., Dai, L., & Yuan, H. (2021). Research on continuous granular material flow detection method and sensor. *Measurement*, *182*, 109773. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109773
14. Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., Behfar, H., & Eskandari, I. (2017). A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, *142*, 165-172. https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.027
15. Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., & Eskandari, I. (2019). Assessing an infrared-based seed drill monitoring system under field operating conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, *162*, 543-551. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.045
16. Karimi, H., Navid, H., & Mahmoudi, A. (2015). Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *13*(1), e0202-e0202. https://doi.org/10.5424/sjar/2015131-6050
17. Kocher, M. F., Lan, Y., Chen, C., & Smith, J. A. (1998). Opto-electronic sensor system for rapid evaluation of planter seed spacing uniformity. *Transactions of the ASAE*, *41*(1), 237-245. https://doi.org/10.13031/2013.17143
18. Körösi, G., Csatári, T., Erdei, C., & Silye, J. (2020). Seed counting sensor and method for detecting blockage of a seed conveying pipe. In: Google Patents.
19. Kumar, R., & Raheman, H. (2018). Detection of flow of seeds in the seed delivery tube and choking of boot of a seed drill. *Computers and Electronics in Agriculture*, *153*, 266-277. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.035
20. Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhiar, I. A., & Wang, W. (2019). Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, *164*, 104899. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104899
21. Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Lakhiar, I. A., Wang, W., & Zhao, J. (2019). Development and experimental analysis of a seeding quantity sensor for the precision seeding of small seeds. *Sensors*, *19*(23), 5191. https://doi.org/10.3390/s19235191
22. Raheman, H., & Kumar, R. (2015). *An embedded system for detecting seed flow in the delivery tube of a seed drill.* Paper presented at the Proceedings of International Conference on Advances in Chemical, Biological & Environmental Engineering (ACBEE). https://doi.org/10.17758/ur.ue0315202

23. Taghinezhad, J., Alimardani, R., & Jafary, A. (2013). Design a capacitive sensor for rapid monitoring of seed rate of sugarcane planter. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 15*(4), 23-29.
24. Xie, C., Zhang, D., Yang, L., Cui, T., He, X., & Du, Z. (2021). Precision seeding parameter monitoring system based on laser sensor and wireless serial port communication. *Computers and Electronics in Agriculture, 190,* 106429. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106429
25. Zhang, J., Hou, Y., Ji, W., Zheng, P., Yan, S., Hou, S., & Cai, C. (2023). Evaluation of a Real-Time Monitoring and Management System of Soybean Precision Seed Metering Devices. *Agronomy, 13*(2), 541. https://doi.org/10.3390/agronomy13020541